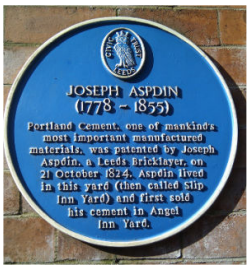
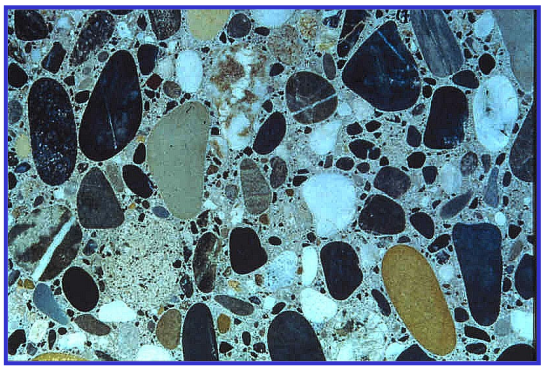
Webinar “Propiedades del Hormigón Fresco y Endurecido”, Abril 2020

Fundamentos del Hormigón en Estado Endurecido





Roberto J. Torrent
Materials Advanced Services,
Buenos Aires, Argentina y Coldrerio, Suiza
torrent.concrete@gmail.com

La reacción principal de la Hidratación del Cemento

- La reacción principal que ocurre cuando la partícula de cemento Portland toma contacto con agua, es la hidratación de los Silicatos de Calcio del clinker (C_3S y C_2S). Esquemáticamente, la reacción química es:

$$\begin{matrix} C_3S \\ C_2S \end{matrix} \quad + \text{Agua} \rightarrow \text{C-S-H} + \text{CH}$$

donde:
C-S-H son los hidratos de silicatos de calcio (también llamados “gel de cemento”)

CH son los cristales de Hidróxido de Calcio (también llamados “Portlandita”).

Cambios durante la hidratación del cemento

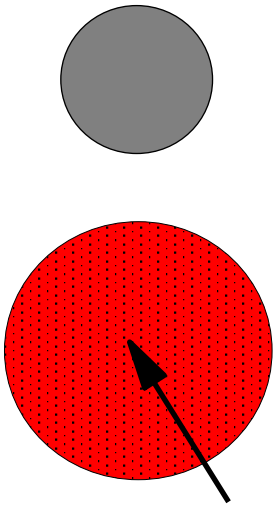
Reacción básica: **$CS + H_2O \rightarrow CSH + Ca(OH)_2$**

Edad (Tiempo)	0	6 horas	28 días	10 años
Grado de Hidratación (%)	0	5	70	100
Calor de Hidratación (J/g)	---	30	350	500
Superficie Específica (m^2/kg)	300	15.000	210.000	300.000
Volumen sólido (m^3)	1,0	1,05	1,7	2,0
Resistencia Relativa a 28 d.	0	1.5	100	150

Los cristales nanométricos de CSH que se van formando son los que generan el aumento formidable de la superficie específica.
Las altísimas fuerzas interparticulares que se desarrollan entre las superficies de los cristales son las responsables de la resistencia mecánica del material.

3

Incremento de volumen durante la Hidratación



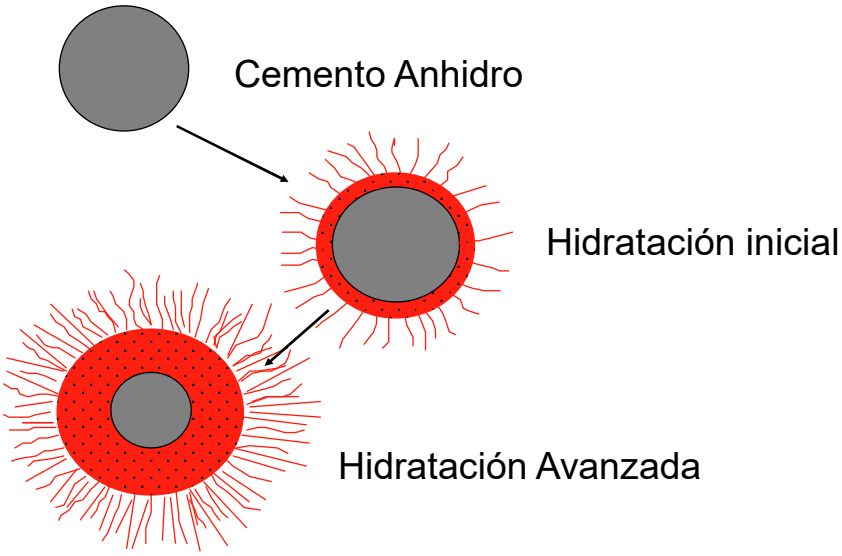
Cemento anhidro
V_o

Cemento
completamente hidratado
$V_h = 2\ V_o$

Poros de “Gel” = $0.28\ V_h$

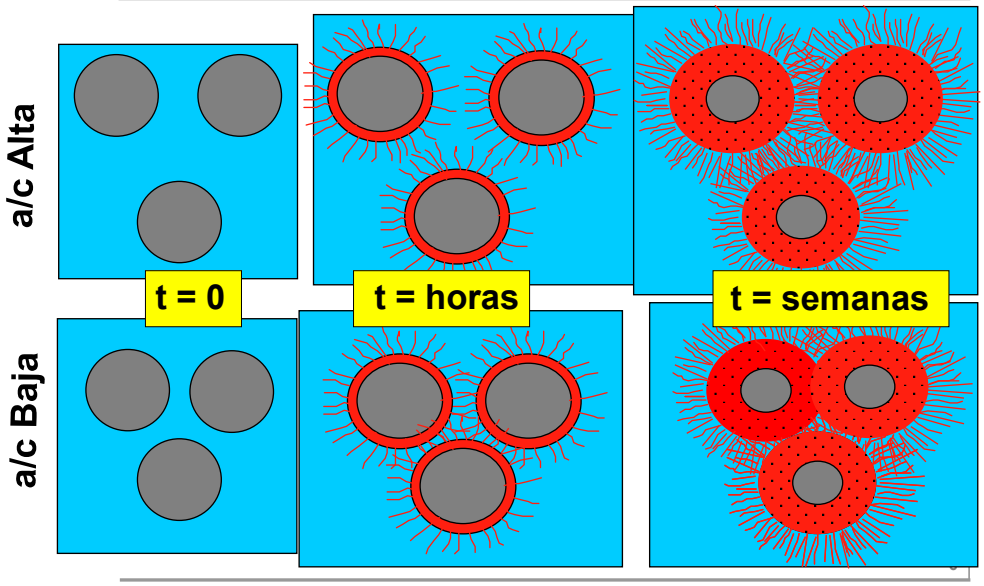
4

Crecimiento de Productos de Hidratación

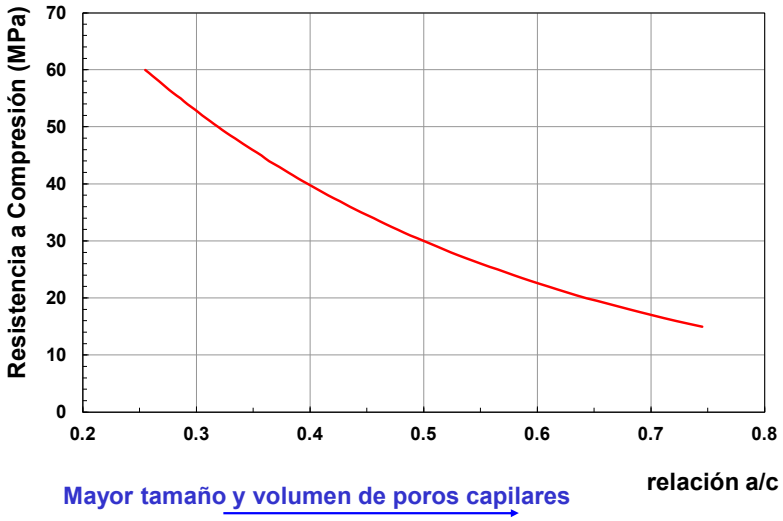


5

Efecto de la relación agua/cemento y la edad sobre la microestructura

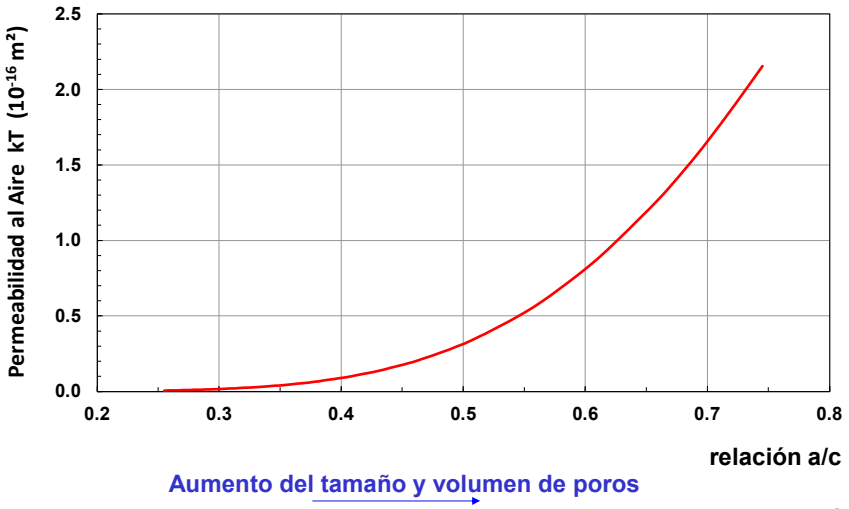


Efecto de la Razón a/c sobre la Resistencia del hormigón



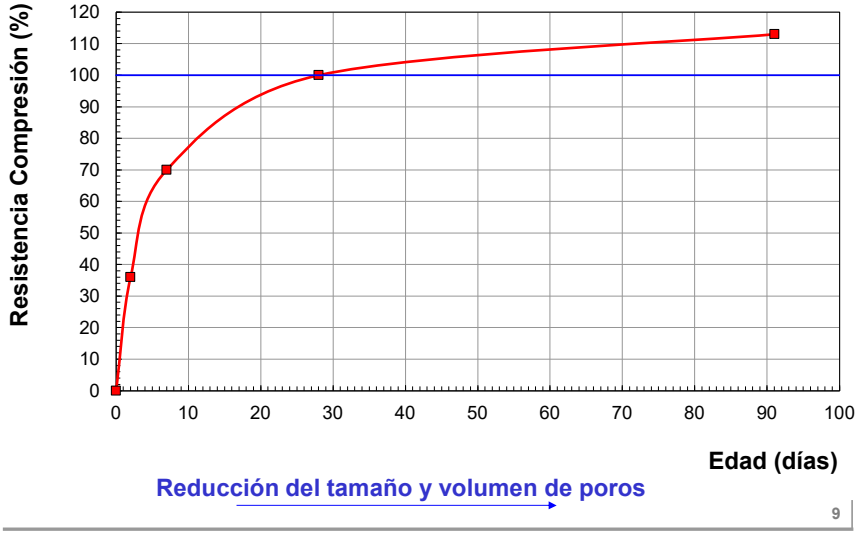
7

Efecto de la Razón a/c sobre la Permeabilidad a gases del Hormigón



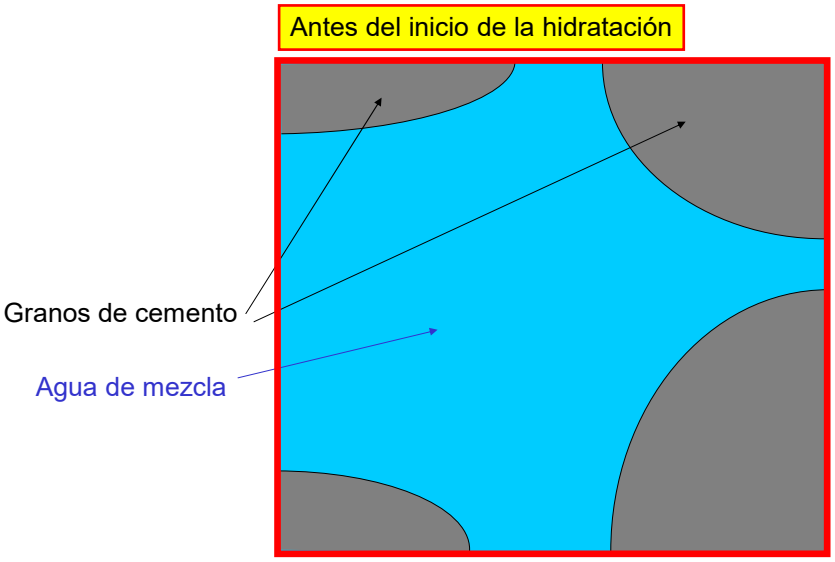
8

Ganancia de Resistencia de OPC con la Edad



9

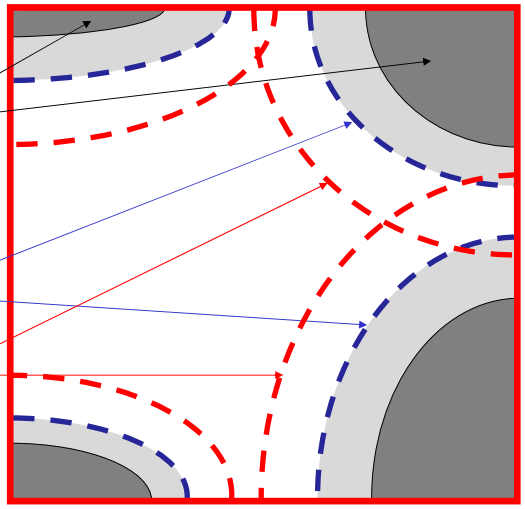
Microestructura de la Pasta de Cemento Endurecida



10

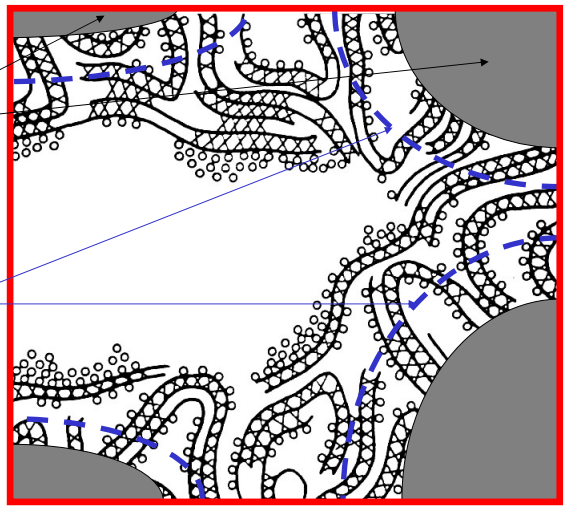
Microestructura de la Pasta de Cemento Endurecida

Durante la hidratación



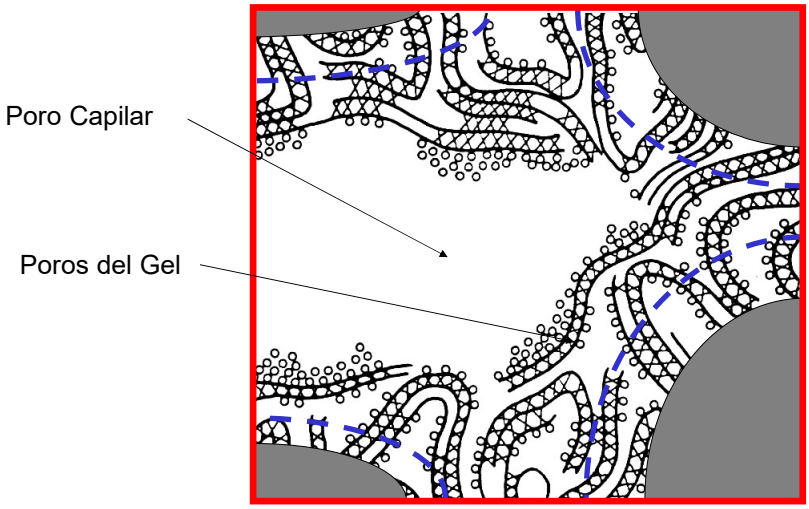
Microestructura de la Pasta de Cemento Endurecida

Crecimiento de los productos de la hidratación – Llenado de los espacios capilares



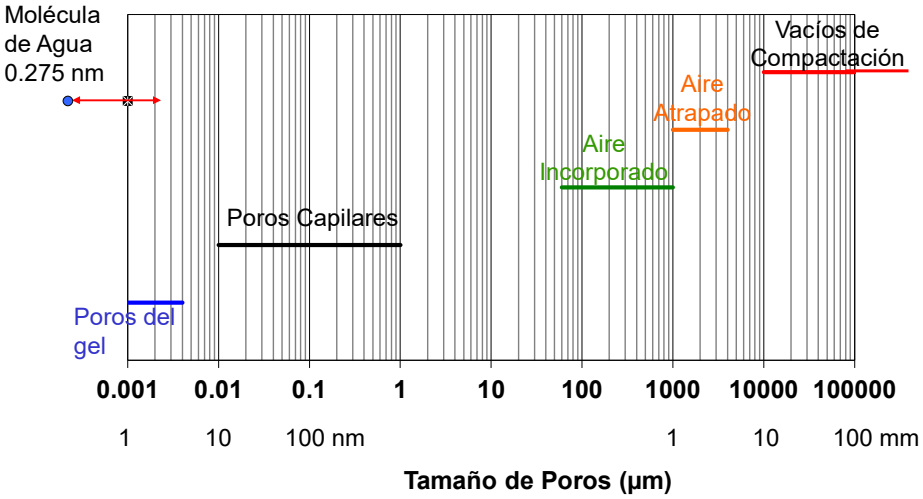
Microestructura de la Pasta de Cemento Endurecida

Poros Capilares y Poros del Gel



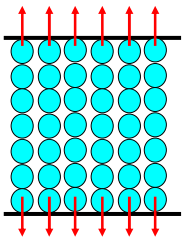
13

Poros y Vacíos en el hormigón Endurecido



14

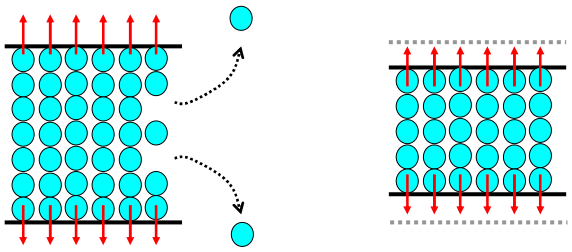
Agua fuertemente vinculada en los Poros del Gel



El agua en los pequeñísimos poros del gel (< 10 nm) está en un estado “cuasi-sólido”, debido a la fuerte interacción con las paredes de los poros (cristales de C-S-H), desarrollando tensiones ↑↓

15

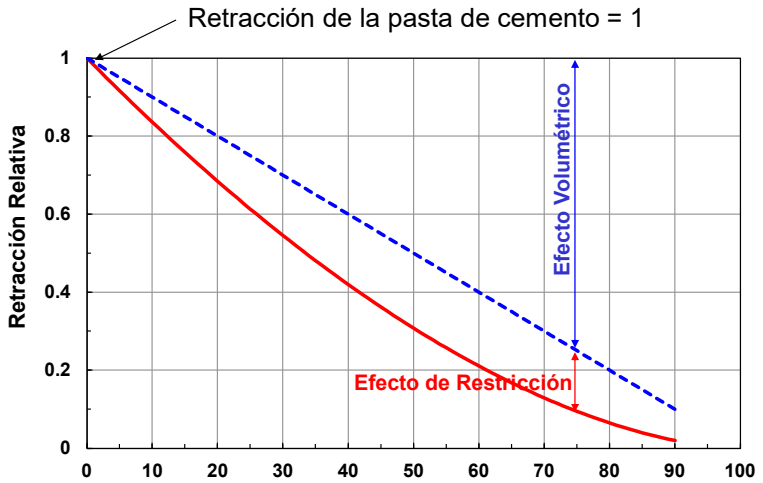
Remoción del agua de los poros del gel → retracción



La remoción por evaporación de moléculas de agua de los poros del gel altera el equilibrio del estado de tensión, conduciendo a una reducción del espacio entre láminas de cristales de C-S-H y, así, a la retracción por secado (uno de los talones de Aquiles del hormigón)

16

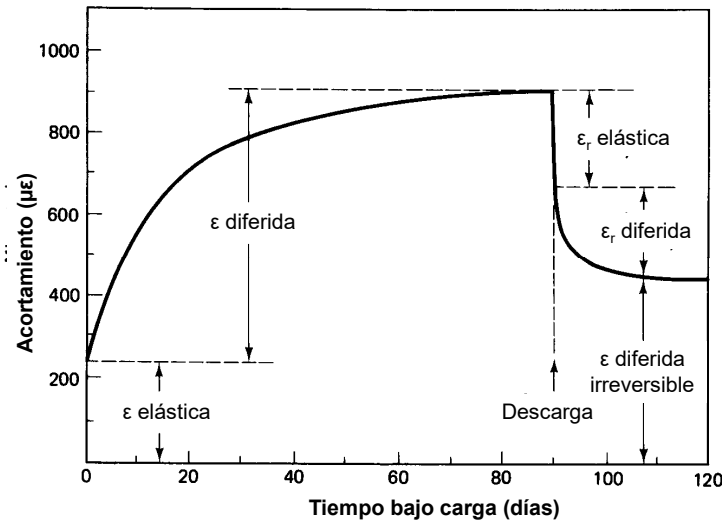
Efecto del Contenido de Agregado sobre la Retracción



Reducción del volumen de los poros de gel →

17

Deformaciones diferidas en el Hormigón



18

Efecto del Agregado sobre la Microestructura

C-S-H

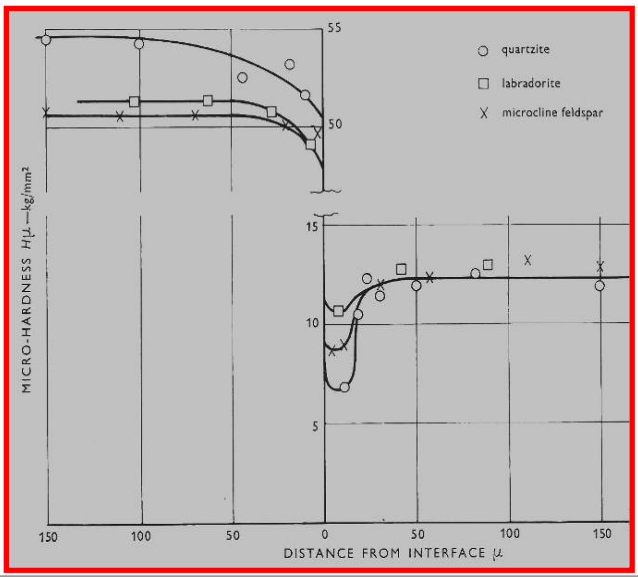
CH

C-A-$\bar{S}$-H (etringita)

Zona de Transición

Matriz de la Pasta de cemento

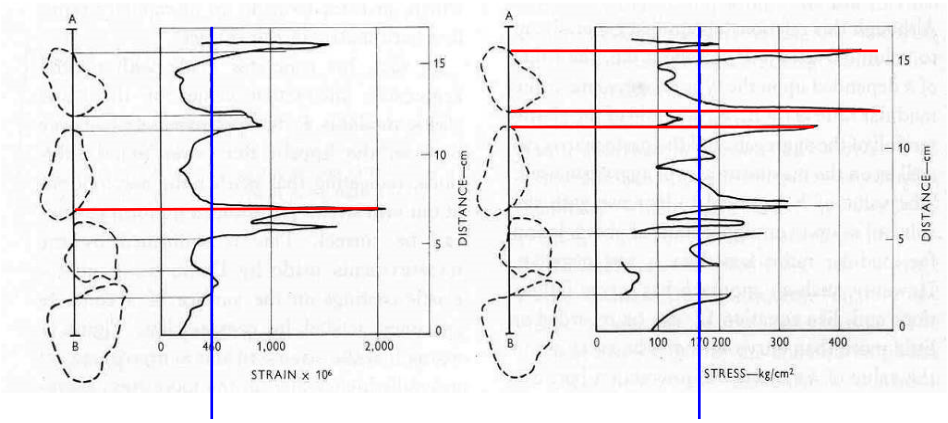
Zona de Transición



Según Lyubimova & Pinus (1962)

Picos de **ε** y **σ** en el hormigón Heterogéneo

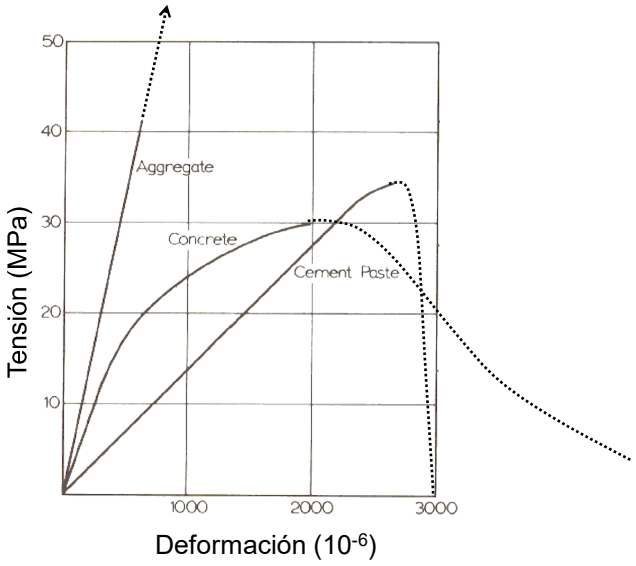
Según Dantu (1958)



Media ε **Media σ**

Típica falla a la compresión por pérdida de adherencia

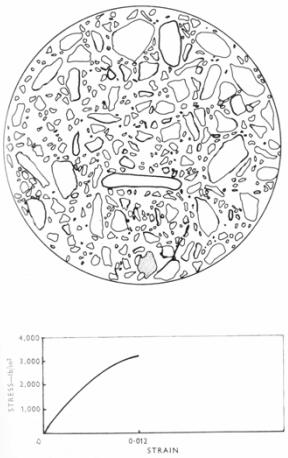
Curvas σ – ε de Pasta, Agregado y hormigón



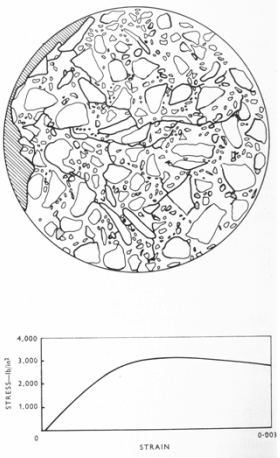
23

Fisuras del hormigón: crecimiento bajo carga

Microfisuras preexistentes a la carga



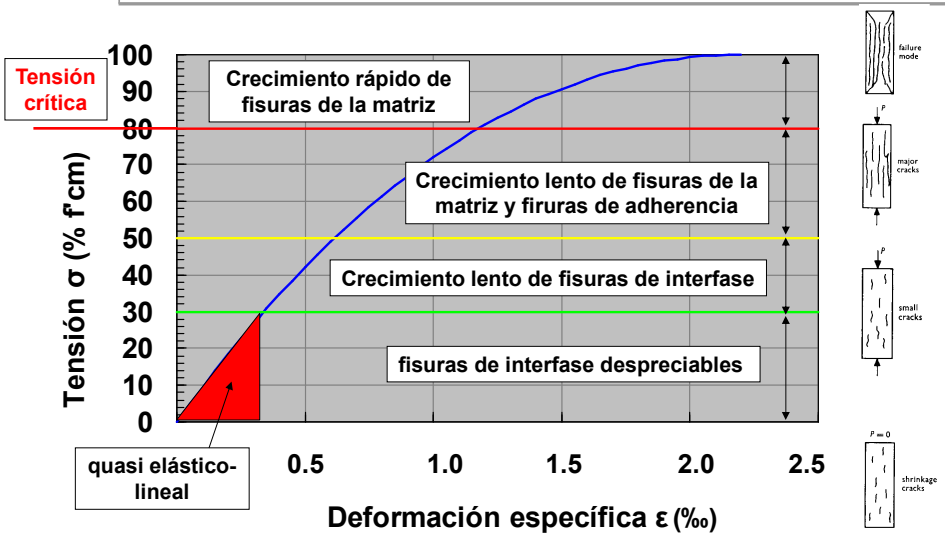
Fisuras de interfase



Propagación de fisuras a través de la matriz

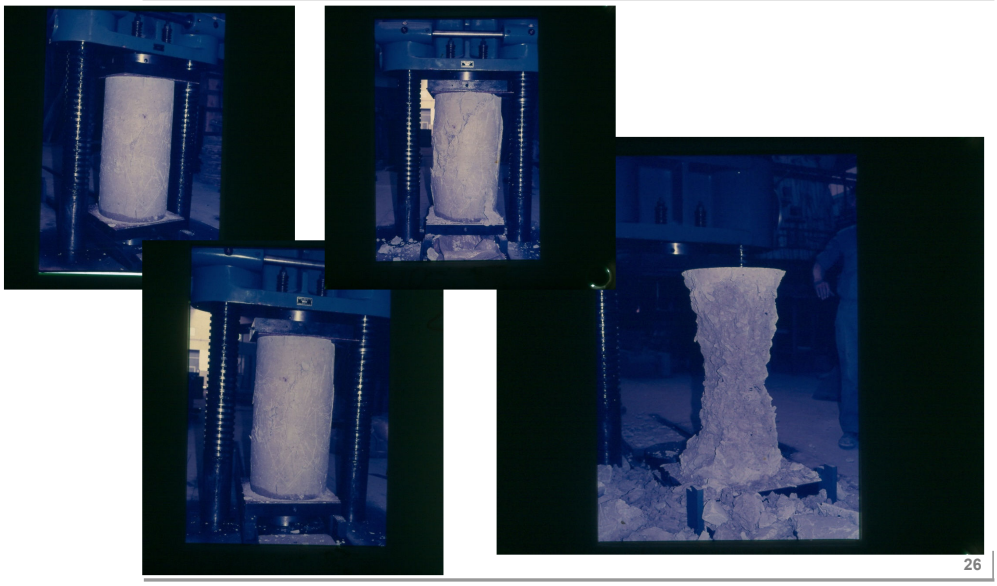
24

Curva σ-ε en Compresión: Aspectos Principales



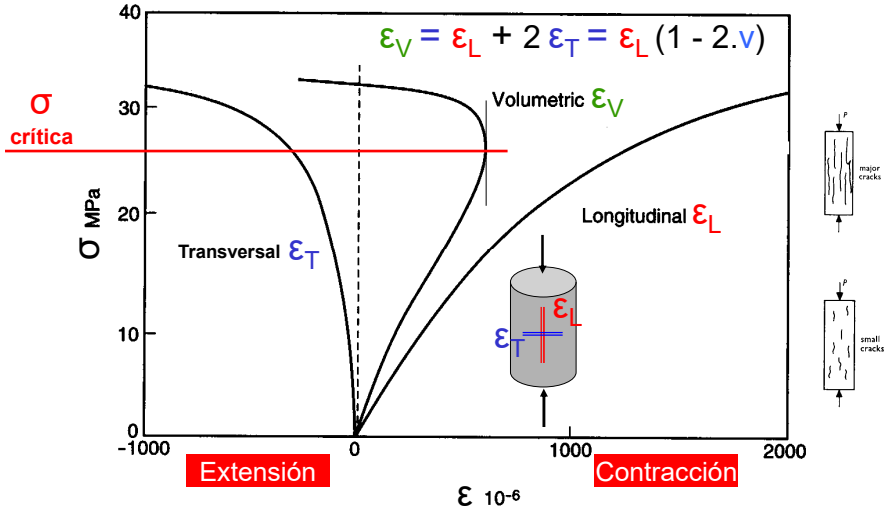
25

Falla en Compresión: INTI H° Masivo Ø45 x 90 cm

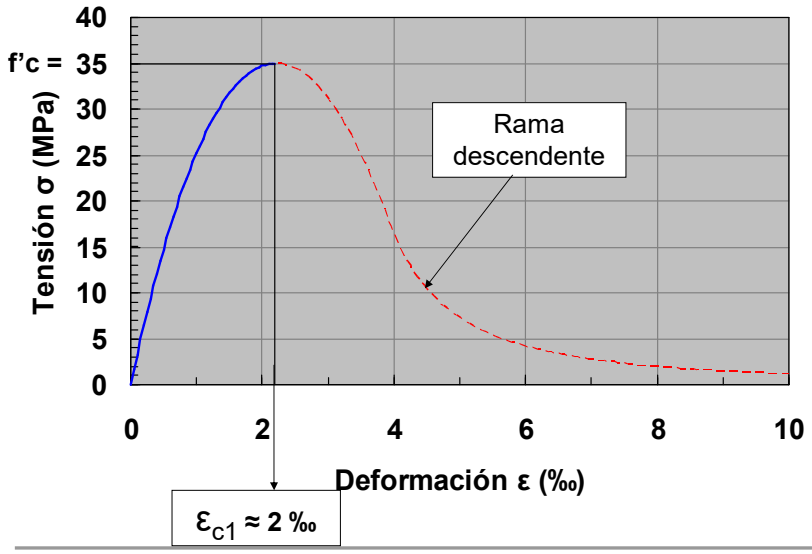


26

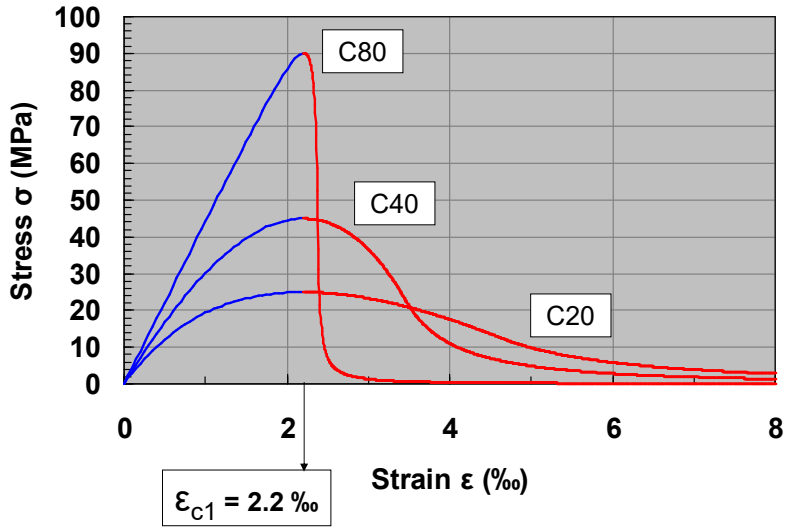
Deformaciones en Compresión



Stress-Strain Behavior in Compression

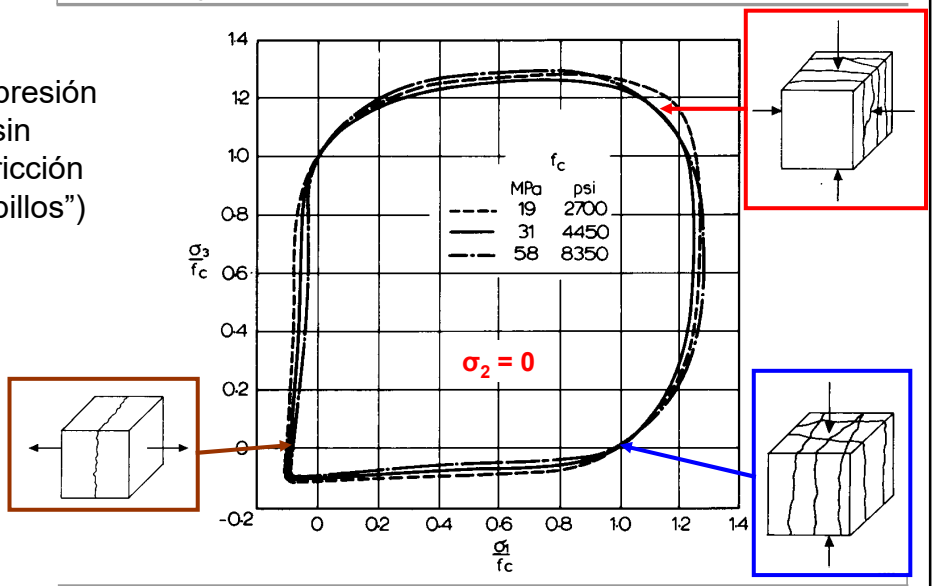


σ-ε for Various Concrete Classes (CEB Model)

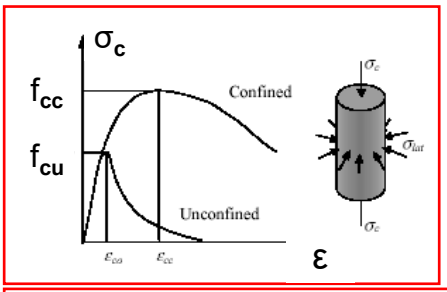


Falla bajo estado biaxial de tensión

Compresión sin restricción ("cepillos")

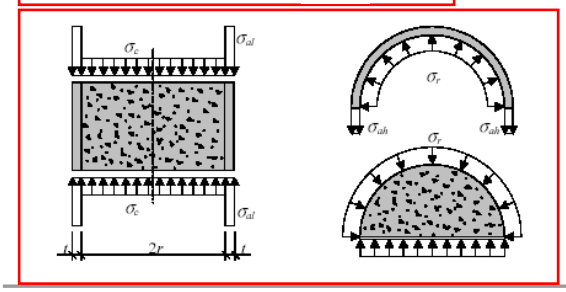


Falla bajo estado triaxial de tensión



Confinamiento Activo

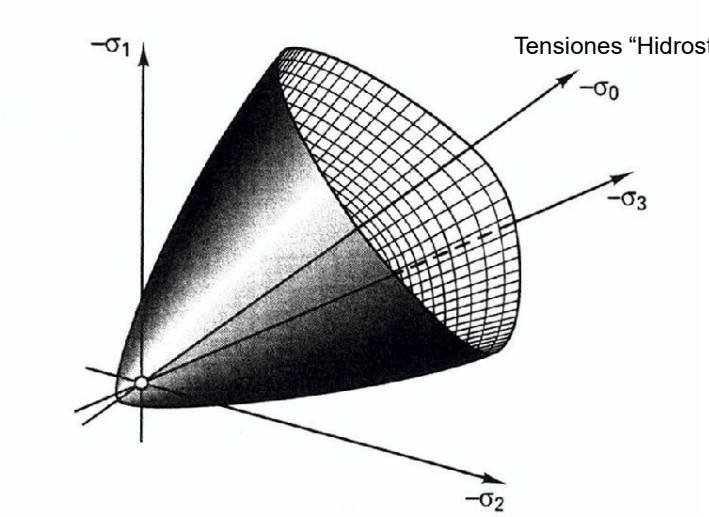
$f_{cc} / f_{cu} = 1 + 4.8\ \sigma_{lat} / f_{cu}$



Confinamiento Pasivo: hormigón confinado en tubos de acero, columnas zunchadas

31

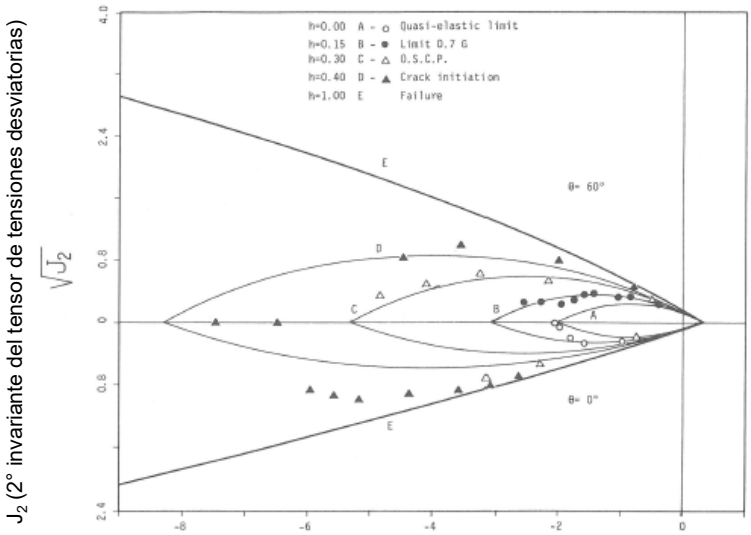
Envolvente de Falla del hormigón



Tensiones “Hidrostáticas”

32

Función de falla y estados intermedios de carga



J_2 (2° invariante del tensor de tensiones desviatorias)

I_1 (1° invariante del tensor de tensiones)

33

[Torrent et al, 1987]

Curva intrínseca de resistencia del hormigón

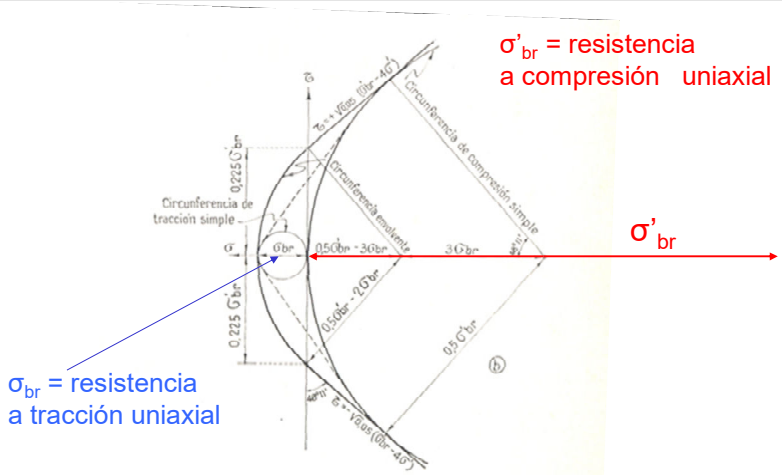
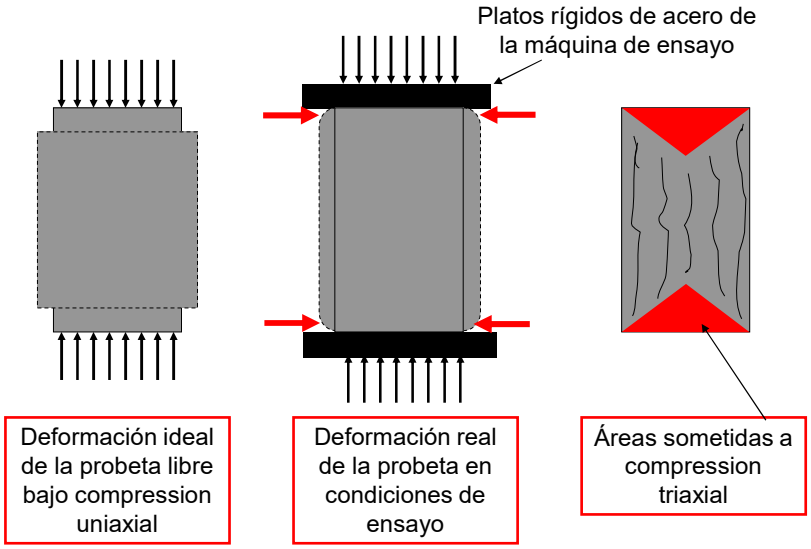


Fig. I - 15. — Curva de resistencia intrínseca. a) Aumento de la resistencia triaxial en función de la presión de confinamiento, b) Forma de la curva intrínseca en las cercanías del origen

34

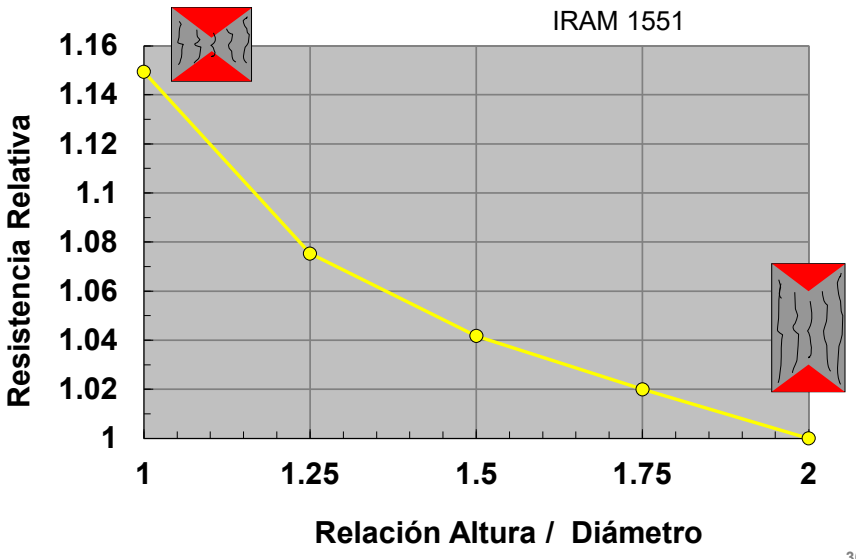
[Moretto, 1967]

Efecto de restricción de los platos de ensayo



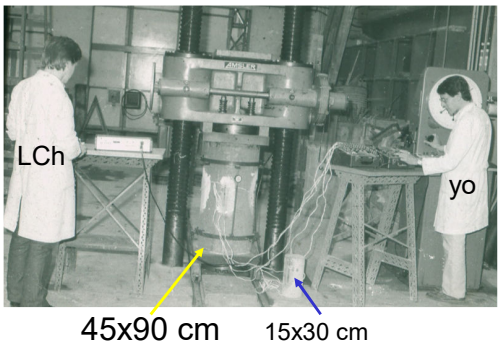
35

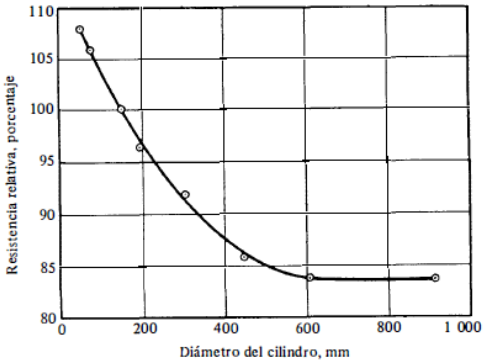
Efecto de la esbeltez sobre la Resistencia



36

Efecto ‘tamaño’ en compresión





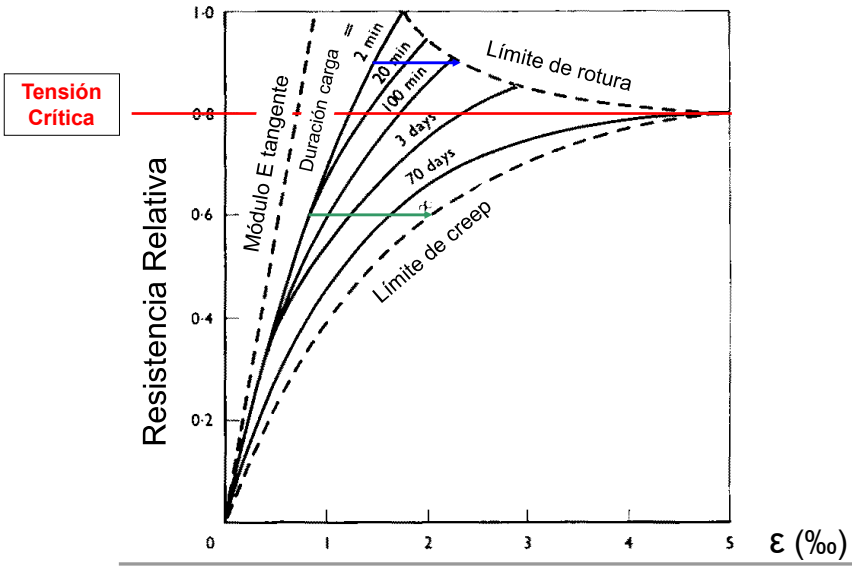
A mayor tamaño de la probeta, mayor probabilidad de que contenga una falla de tamaño y ubicación más crítica para la fractura ‘frágil’ (eslabón más débil de la cadena)

A mayor tamaño del cilindro menor f’c y también menor dispersión de resultados

37

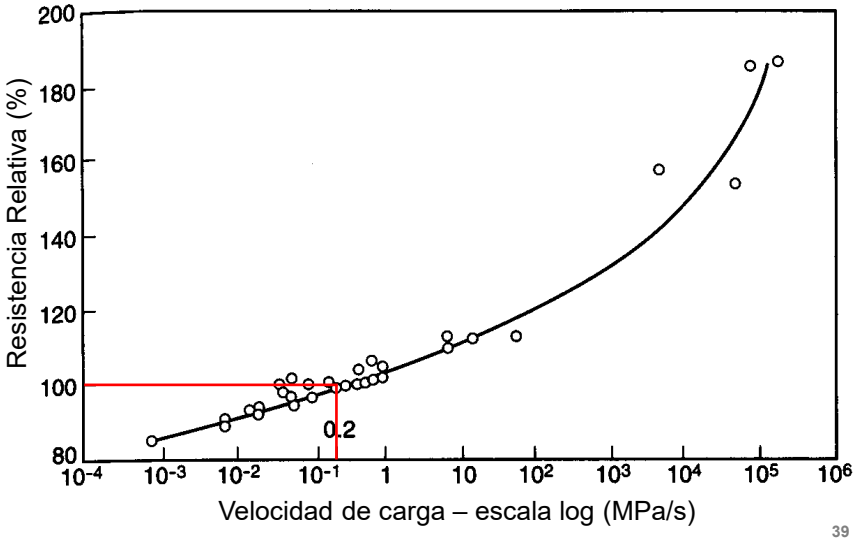
[Weibull, 1939] [Neville, 1997]

Rotura del Hormigón: Efecto de Velocidad de Carga

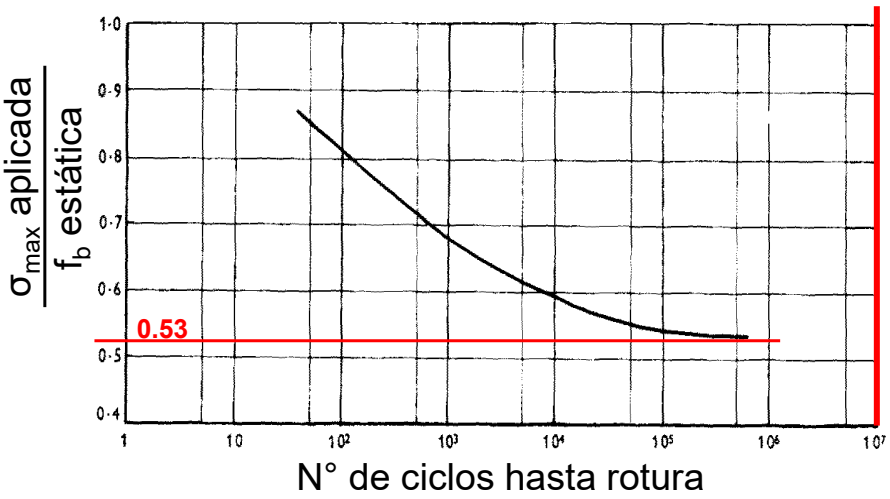


38

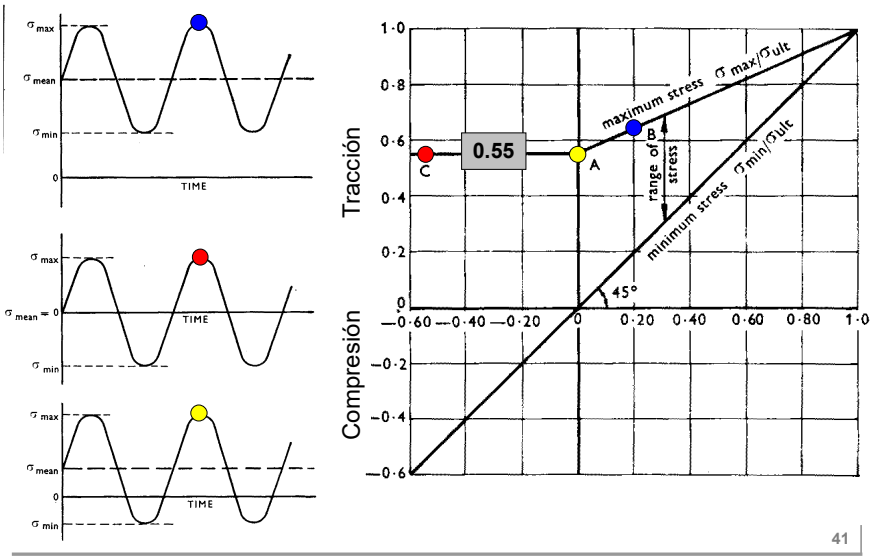
Efecto de Velocidad de Carga sobre f'cm



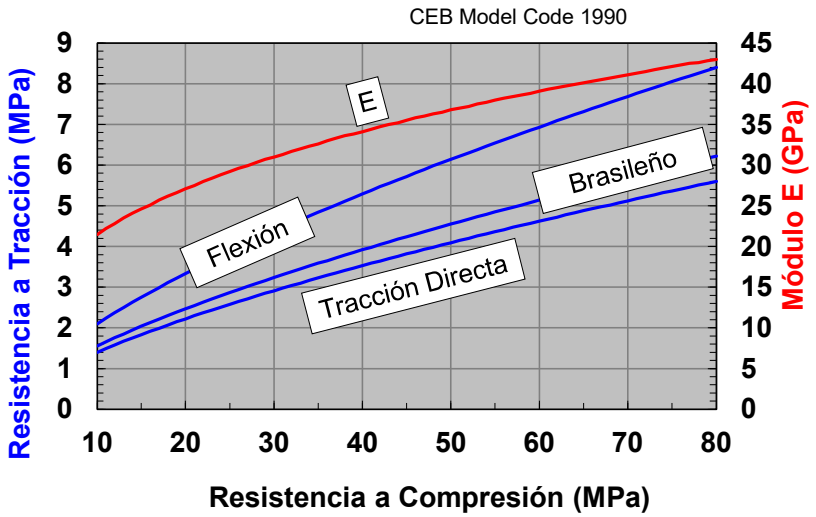
Fatiga del hormigón en Flexión $\sigma_{min} = 0$



Resistencia a Fatiga en Tracción



Relaciones entre Propiedades Mecánicas (~~!!)



Conclusiones

- El Hormigón Endurecido es un sistema complejo, heterogéneo, compuesto de fases sólidas y poros de tamaños muy diferentes.
- El volumen y tamaño de los poros condiciona, en gran medida, el comportamiento del hormigón endurecido, especialmente en lo que se refiere a:
  - La resistencia mecánica
  - La permeabilidad y la resistencia al ingreso de agentes agresivos en general
  - y, por lo tanto, la durabilidad
  - La contracción por secado y las ε diferidas
  - La resistencia al congelamiento

Conclusiones

- Los agregados contribuyen a la: rigidez, estabilidad volumétrica, resistencia a la abrasión, durabilidad, ductilidad y economía del hormigón.
- La mayor calidad de la pasta de cemento (menor razón a/c) mejora la mayoría de las propiedades del hormigón endurecido: resistencia, módulo de elasticidad, impermeabilidad, durabilidad.
- La mayor cantidad de la pasta de cemento (mayor contenido de cemento y agua) empeora muchas de las propiedades del hormigón endurecido: menor estabilidad volumétrica, mayor suceptibilidad al agrietamiento, mayor permeabilidad, menor durabilidad, mayor costo.

Conclusions

- El comportamiento mecánico del hormigón bajo cargas de corta y larga duración o repetidas es determinado en gran medida por la formación y propagación de fisuras
- Impedir la propagación de fisuras mediante estados de compresión biaxiales y, especialmente triaxiales, aumenta considerablemente la resistencia del hormigón
- Por el contrario, acciones que faciliten la propagación de fisuras, tales como las tensiones de tracción o la aplicación de cargas de larga duración o repetidas, reducen la Resistencia del Hormigón
- Esto explica algunas cuestiones prácticas como la necesidad de un correcto encabezado y la influencia de la esbeltez de la probeta y de la velocidad de carga sobre la resistencia a compresión del hormigón

45

References

1. Mehta P.K., Monteiro PJM, "Concrete: Structure, Properties, and Materials", 2nd Ed. (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993),
2. Feldman, R.F. and Sereda, P.J., "A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties", Mater. & Struct., n.6, Nov-Dec. 1968, pp. 509-19.
3. Swamy N., "Aggregate-Matrix Interaction in Concrete Systems", Structure, Solid Mechanics and Engineering Design, Part 1, (Ed. M. Te'eni), John Wiley & Sons (Interscience), Bristol, 1971, pp. 301-315.
4. "The Structure of Concrete and its Behavior under Load", Proc. Intern. Conf., A.E. Brooks and K. Newman (Eds.), Cement and Concrete Assoc., London, Sept. 1965, 540 p.
5. "CEB-FIP Model Code 1990", CEB Bulletin d'Information N° 203, Lausanne, July 1991
6. A.M. Neville, "Properties of Concrete", Longman, 4th Ed., London 1997
7. Weibull, W. (1939). "The phenomenon of rupture in solids." Proc., Royal Swedish Institute of Engineering Research, v153, Stockholm, 1--55.
8. Balan T., Spacone E., Kwon, M., "A 3D hypoplastic model for cyclic analysis of concrete structures", Engineering Structures 23 (2001), 333-342.
9. Johansson M., Akesson M., "Finite Element Study of Concrete-Filled Steel Tubes Using a New Confinement-Sensitive Concrete Compression Model".
10. Moretto, O. «Curso de Hormigón Armado», El Ateneo, Buenos Aires, 1967, 818 p.
11. Torrent, R.J., Dvorkin, E.N. and Alvaredo, A.M., "A model for work-hardening plasticity and failure of concrete under multiaxial stresses", Cem. Concr. Res.,v.17, 1987, pp. 939-950
12. Gordon, J.E. (1991). "The New Science of Strong Materials: Or Why You Don't Fall Through the Floor", Penguin Science,

46